第 37 卷第 8 期
2017 年 4 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.8
Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201601230160
刘伟玮,刘某承,李文华,郑颖,王月婵.辽东山区林参复合经营土壤质量评价.生态学报,2017,37(8):2631-2641.
Liu W W, Liu M C, Li W H, Zheng Y, Wang Y C.Soil quality assessment of a forest-ginseng agroforestry system in the mountainous region of eastern Liaoning Province, Northeast China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(8):2631-2641.

辽东山区林参复合经营土壤质量评价

刘伟玮[1,2],刘某承[1,*],李文华[1],郑　颖[3],王月婵[3]

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京　100101
2 中国科学院大学, 北京　100049
3 辽宁省林业科学研究院, 沈阳　110032

摘要:林参复合经营是辽东山区典型的林下经济模式之一,而林下参的生长对于环境条件要求很高,其中,土壤质量是制约人参生长的重要因素之一,并对人参产业的健康发展至关重要。目前,阔叶混交林、针阔混交林和蒙古栎纯林是辽东山区广泛分布的林参复合经营林分类型,选择 3 种林分下立地特征相似、人参种植年限不同的样地,测定土壤物理、化学和生物学因子共 25 项指标,采用方差分析、主成分分析、相关分析等统计学方法和专家经验法构建了林参复合经营土壤质量评价最小数据集(MDS),并利用模糊数学法对不同样地土壤质量进行了定量评价。结果表明,研究区林参复合经营土壤质量评价最小数据集包括容重、pH、有机质、速效 K、全 Zn、微生物量 N、酸性磷酸酶和细菌共 8 项指标。此外,土壤质量值由高到低依次为针阔混交林对照样地(0.764)>蒙古栎纯林对照样地(0.745)>针阔混交林 14a 人参样地(0.614)>蒙古栎纯林 20a 人参样地(0.385)>阔叶混交林 12a 人参样地(0.361)>阔叶混交林对照样地(0.354)>阔叶混交林 6a 人参样地(0.323)>阔叶混交林 9a 人参样地(0.308)>阔叶混交林 3a 人参样地(0.230),说明林分类型特征和人参种植年限对土壤质量会产生不同程度影响。今后,在辽东山区林参复合经营发展过程中,可以该最小数据集为基础,充分考虑土壤质量状况,并适当进行管理,以保障人参健康生长,促进人参产业可持续发展。

关键词:林参复合经营;土壤质量评价;最小数据集;模糊数学法;辽东山区

Soil quality assessment of a forest-ginseng agroforestry system in the mountainous region of eastern Liaoning Province, Northeast China

LIU Weiwei[1,2], LIU Moucheng[1,*], LI Wenhua[1], ZHENG Ying[3], WANG Yuechan[3]

1 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*
3 *Liaoning Academy of Forestry*, *Shenyang* 110032, *China*

Abstract: A forest-ginseng agroforestry system produces significant economic benefits. However, the successful growth of ginseng requires particular environmental conditions, with soil quality being one of the most important factors restricting the growth of this plant. Therefore, understanding the optimal soil conditions for ginseng is essential to the healthy development of the ginseng industry. Currently, broad-leaved mixed forest (BM), conifer and broad-leaved mixed forest (CB), and *Quercus mongolica* forest (QM) are widely distributed forest-ginseng agroforestry stand types. In this study, we selected nine samples from three stand types in eastern Liaoning Province, China, that had similar stand characteristics but different ginseng cultivation years. Twenty-five soil quality factors were measured, including physical, chemical, and biological indicators. We then established the minimum data set (MDS) of forest-ginseng agroforestry soil assessment using analysis of

---

基金项目:林业软科学研究(2014-R05);中国工程院咨询项目(2013-XZ-22);黔科合院士站(2014)4006
收稿日期:2016-01-23;　　**网络出版日期**:2016-10-29
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liumc@ igsnrr.ac.cn

variance, principal component analysis, correlation analysis, and expert experience method, and we used the fuzzy mathematics method to quantitatively evaluate soil quality. The results showed that (1) the optimal MDS to assess soil quality in the forest-ginseng agroforestry of this region is composed of eight indices: bulk density, pH, organic matter, available K, total Zn, microbial biomass N, acid phosphatase, and bacteria. (2) Soil quality value decreased in the following order: non-cultivated ginseng control sample in CB (0.764) > non-cultivated ginseng control sample in QM (0.745) > 14-year-old ginseng sample in CB (0.614) > 20-year-old ginseng sample in QM (0.385) > 12-year-old ginseng sample in BM (0.361) > non-cultivated ginseng control sample in BM (0.354) > 6-year-old ginseng sample in BM (0.323) > 9-year-old ginseng sample in BM (0.308) > 3-year-old ginseng sample in BM (0.230). These results suggest that forest stand type and ginseng cultivation years had different influences on soil quality. In future efforts to develop forest-ginseng agroforestry in this region, full consideration must be given to soil quality based on the soil quality MDS, and appropriate management measures need to be implemented. This study provides insights for ginseng cultivation and the sustainable development of the ginseng industry.

Key Words: forest-ginseng agroforestry; soil quality assessment; minimum data set; fuzzy mathematics method; eastern Liaoning Province

土壤质量是指土壤在生态系统边界范围内,维持作物生产能力,保持环境质量及促进动植物健康的能力[1]。土壤质量是土壤多种功能的综合体现,对土壤质量进行评价,了解土壤的质量状况,可以为寻找土壤质量的障碍因素提供依据[2-4]。然而考虑到土壤质量评价目的和尺度的不同,以及土壤本身作为一种复杂的多功能实体,当前对于土壤质量评价并没有统一的标准[5-6]。森林土壤质量影响着林木和林下植物的健康状态,目前,对于森林土壤质量的评价多集中在不同植被恢复类型、不同林龄阶段、低质林改造等方面,而对林下作物种植的土壤质量评价研究还比较少[7-9]。此外,土壤质量评价的指标包括了物理、化学和生物学方面,并且生物学指标正愈来愈受到重视[10-14]。考虑到土壤性质的时空变异性、指标获取的成本以及指标间的共线性等因素,最小数据集(MDS)作为能够反映土壤质量所需的最少指标参数集合,在土壤质量评价中已被广泛采用。

辽东山区是我国人参的主产区之一,在当前林业制度改革和相关政策的实施背景下,林参复合经营呈现出一种良好的发展前景。然而,土壤质量问题一直是制约人参产业发展的重要因素之一。人参是一种多年生草本植物,在生长过程中人参根须吸收养分的同时,也不断分泌物质,与土壤之间形成一种耦合作用,导致土壤质量处在一种动态变化过程中,而人参的生长对于土壤质量要求很高,当条件不适时,往往出现生理性或浸染性病害,从而严重影响林农的经济效益。近些年,相关学者围绕人参连作障碍和病害等问题对土壤养分、微量元素、土壤酶、以及土壤微生物指标等方面进行了研究[15-18],然而对于人参土壤质量的评价依然欠缺。因此,本文以研究区广泛分布的 3 种林参复合经营林分类型下不同年限人参样地为研究对象,测定了 25 项土壤物理、化学和生物学指标,在此基础上利用主成分分析法和专家经验法构建了林下参地土壤质量评价最小数据集,并采用模糊数学法对林下参地土壤质量进行了定量评价,以期为林下参地的选择和改良提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于辽宁省东部桓仁满族自治县境内(124°27′—125°40′E,40°54′—41°32′N)。该地区为长白山脉的西南延续,温带湿润季风型大陆气候,四季分明,年平均气温 7.4 ℃,平均活动积温 3184 ℃,年平均相对湿度 66%,平均无霜期 153 d 左右,多年平均日照时数 2538 h,多年平均降水量 870 mm,森林土壤为暗棕壤类型。

1.2　样地选择

2015 年 8—9 月,在桓仁县选择阔叶混交林、针阔混交林和蒙古栎林(*Quercus mongolica* forest)3 种广泛分布的林参复合经营林分类型进行样地调查,记录了不同林分类型的立地特征概况(表 1),并对群落内乔木优势物种、胸径、树高,以及灌草本优势物种进行了调查记录。研究区采样点位置如图 1 所示。

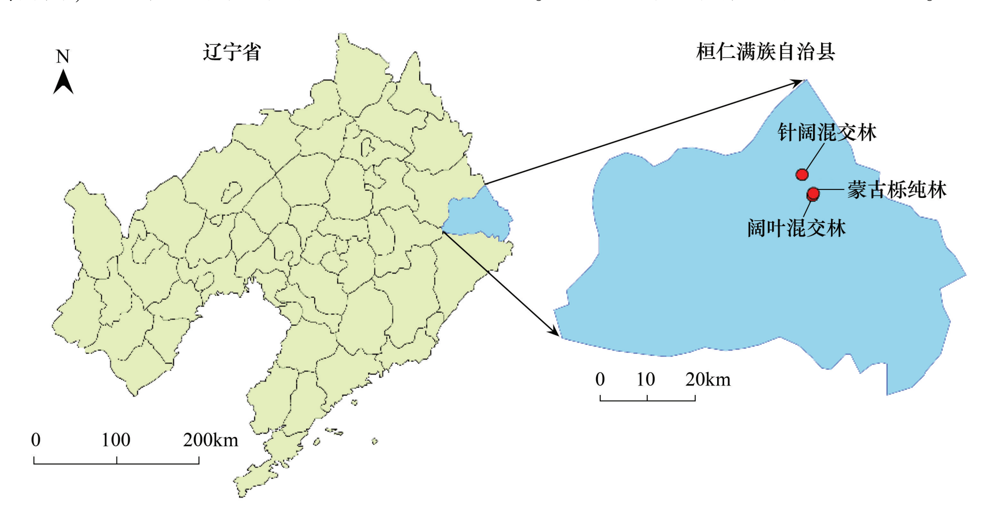


图 1　研究区采样点位置图

Fig.1　Location of study site in Huanren, eastern of Liaoning Province

表 1　不同林分类型标准样地概况

Table 1　Stand characteristics of the different stand type plots

林分类型 Stand types	坡位 Slope position	坡向 Aspect	坡度 Slope gradient/(°)	海拔 Elevation/m	林分密度 Density/(株/hm^2)	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/cm	郁闭度 Canopy density
阔叶混交林(BM) Broad-leaved mixed forest	上坡	正东	24	442	765	17.37	18.64	0.75
针阔混交林(CB) Conifer and broad-leaved mixed forest	中坡	东南	20	534	585	20.82	19.85	0.70
蒙古栎纯林(QM) *Quercus mongolica* forest	上坡	正东	20	529	495	24.26	22.55	0.70

阔叶混交林林龄在 24 a 左右,群落内乔木优势树种包括糠椴(*Tilia mandschurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、辽东栎(*Quercus wutaishansea*)、元宝槭(*Acer truncatum*)等,灌木优势物种包括胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、穿龙薯蓣(*Discorea nipponica*)、卫矛(*Euonymus alatus*)等;草本优势物种包括人参(*Panax ginseng*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、蛇含(*Potentilla kleiniana*)、两型豆(*AmpHicarpaea trisperma*)、苦麦菜(*Cichorium endivia*)等。

针阔混交林林龄在 33 a 左右,群落内乔木优势物种包括长白落叶松(*Larix olgensis*)、辽东栎、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、核桃楸、糠椴等,其中针阔比例在 6∶4 左右;灌木优势物种包括毛榛(*Corylus mandshurica*)、胡枝子等;草本优势物种包括人参、白屈菜(*Chelidonium majus*)、蛇含、多齿蹄盖蕨(*Athyrium multidentatum*)、苦麦菜等。

蒙古栎林龄在 40 a 左右,群落内乔木物种主要是蒙古栎,间有元宝槭、白桦(*Betula platypHylla*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*);灌木优势物种包括毛榛、胡枝子、卫矛;草本优势物种包括人参、苍术(*Atractylodes Lancea*)、和尚菜(*Adenocaulon himalaicum*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)等。

1.3 土壤样品采集

通过对样地实地考察,结合现有人参种植情况,分别采集阔叶混交林下 3、6、9a 和 12a 人参根围土壤,针阔混交林下 14a 人参根围土壤,蒙古栎纯林下 20a 人参根围土壤,以及 3 种林分样地未种植人参的对照土壤共 9 种类型。土壤样品于 2015 年 9 月初采集,采集过程如下:分别在不同林分不同参龄样地中间隔一定距离,随机选取 3 颗人参,在除去表层枯枝落叶后,采取边抬参边取土的方法,顺着人参及其须根生长方向收集周围土壤,采集鲜土按顺序分类编号后,一部分保存在-4℃便携式冰箱中用于土壤微生物和土壤酶测定,一部分常温保存用于土壤养分测定,并用 100 cm^3环刀采集土壤用于测定土壤物理性质。此外,分别在 3 种不同林分类型下,随机采集未有人参种植的 3 份土壤作为对照,土壤采集深度与人参根须土壤深度一致,编号后与人参土壤一起保存带回实验室尽快进行分析。

1.4 土壤样品及数据分析

1.4.1 土壤样品测定

本研究土壤样品测定的指标共 25 项,其中物理指标 5 项(容重、最大持水量、毛管持水量、总孔隙容积、含水量),化学指标 11 项(pH、有机质、全 N、全 P、速效 P、全 K、速效 K、全 Mn、全 Fe、全 Zn、全 Cu),生物学指标 9 项(微生物量碳、微生物量氮、过氧化物酶、β-1,4-葡萄糖苷酶、β-1,4-N-乙酰葡糖氨糖苷酶、酸性磷酸酶、细菌、真菌、放线菌)。

其中,土壤容重和总孔隙度采用环刀法测定;土壤含水量、最大持水量、毛管持水量采用烘干法测定;pH 值采用电位法测定。土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全 N 采用德国 Elementar 公司 vario MACRO cube 元素分析仪直接测定;速效 P、K 采用 2%的$(NH_4)_2CO_3$浸提后[19],应用美国 PerkinElmer 公司 ICP-OES 测定;全 P、全 K,以及 Mn、Fe、Zn、Cu 采用盐酸-高氯酸-氢氟酸消煮后,应用美国 PerkinElmer 公司 ICP-OES 测定。土壤酶采用微孔板荧光法,使用多功能酶标仪(SynergyH4,BioTek)测定[20]。土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-浸提-TOC 仪器测定法;微生物量氮采用氯仿熏蒸-浸提-茚三酮比色法测定[21]。土壤微生物采用磷脂脂肪酸分析法[22],其中,细菌以 i15:0、a15:0、i16:0、i17:0、a17:0、16:1ω7c、16:1ω9c、17:1ω7c、18:1ω7c、cy17:0 和 cy19:0 等 11 种脂肪酸表示,真菌以 18:2ω6c、18:3ω6c、18:1ω9c 和 16:1ω5c 表示,放线菌以 10me16:0、10me17:0 和 10me18:0 表示[23-25]。

1.4.2 数据分析方法

(1)最小数据集的确定

针对当前研究区内人参广泛种植在不同林分类型下,本研究选择 3 种典型林分类型下人参样地作为研究对象,旨在构建更具普适性的林参复合经营土壤质量评价最小数据集。因此,1 首先考虑了不同林分类型对土壤质量的影响,其对各土壤因子的影响大小通过对不同林分类型下土壤属性的多变量方差分析确定,由此计算的可调整决定系数(R^2)用来表示林分类型对土壤因子属性的影响大小[26]。2 计算各土壤因子在所有特征值≥1 的主成分(PC)上的载荷,据此将在旋转矩阵中同一 PC 上载荷≥0.5 的土壤指标分为 1 组,若某土壤因子同时在两个 PC 上的载荷高于 0.5,则该因子应归并到与其他因子相关性较低的那一组;同时,在计算各土壤因子的主成分载荷过程中,考虑了土壤因子在所有主成分载荷上的综合载荷 Norm 值,而不仅是在单个主成分上的载荷[27]。该 Norm 值越大表明其解释总体土壤质量信息的能力越强,计算公式如下(式 1)。3 对各组各土壤因子的两项得分进行线性转化,得到最终分值。选择各组分值最高指标,以及最高分值 5%范围内的指标[28],作为候选指标数据集。4 进一步分析候选指标间的相关性,同时结合专家经验法确定最终的 MDS。

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i}^{k} (u_{ik}^2 \lambda_k)} \qquad (1)$$

式中,N_{ik} 为第 i 个变量在特征值≥1 的前 k 个主成分上的综合载荷;u_{ik} 为第 i 个变量在第 k 个主成分上的载荷,λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

(2)土壤质量评价指数

在模糊综合评价中,隶属度值由评价指标所属的隶属度函数决定,一般分为升型和降型函数:

$$F(X)=\begin{cases}0.1 & (X \leqslant X_{\min}) \\ 0.9 \times (X-X_{\min})/(X_{max}-X_{\min})+0.1 & (X_{\min}<X<X_{\max}) \\ 1 & (X \geqslant X_{\max})\end{cases} \tag{2}$$

$$F(X)=\begin{cases}0.1 & (X \geqslant X_{\max}) \\ 0.9 \times (X_{\max}-X)/(X_{\max}-X_{\min})+0.1 & (X_{\min}<X<X_{\max}) \\ 1 & (X \leqslant X_{\max})\end{cases} \tag{3}$$

根据最小数据集中不同土壤因子对于人参土壤质量的正负效应选择相应隶属度函数,确定其隶属度值。各土壤因子在所有样地中所测定的最小值和最大值分别记作 X_{min} 和 X_{max} 。

土壤质量综合评价指数的计算:

$$\mathrm{SQI}=\sum_{i=1}^{n} W_i \times F(X_i) \tag{4}$$

式中, W_i 为土壤因子权重, $F(X_i)$ 为土壤因子隶属度,n 为土壤因子个数。其中,土壤因子权重以某因子与其他因子之间相关系数的平均值占所有土壤评价因子相关系数平均值总和的比来表示[27]。

1.4.3　数据处理

采用 SPSS 17.0、Excel 和 Origin 8.5 进行数据处理和制图。采用多元方差分析,运用 LSD 方法对不同林分类型土壤因子间差异进行分析;采用主成分分析确定土壤质量因子候选指标集;采用 Pearson 相关系数分析候选指标集中土壤因子间的相关性;采用单因素多重比较分析,运用 Turkey 方法对最小数据集在不同林分类型样地中的差异性进行分析。

2　结果与分析

2.1　不同林分类型对土壤性质的影响显著性分析

通过多元方差分析对阔叶混交林、针阔混交林和蒙古栎纯林 3 种林分下未种植人参土壤的 25 项土壤因子进行分析,结果如表 2 所示。从中可以看出,除全 Fe、全 Zn 以外,其它土壤因子在不同林分类型下均具有极显著差异,说明林分类型对土壤性质具有明显影响。因此,在构建林下参土壤质量评价 MDS 的过程中,应考虑林分类型对土壤因子的影响程度。

表 2　不同林分类型土壤因子差异显著性分析

Table 2　Significance of difference in soil properties among the different stand types

土壤因子 Soil factors	林分类型 Stand type			*P*
	BM	CB	QM	
BD/(g/cm³)	1.30±0.02	0.88±0.09	0.98±0.10	0.001
MMC/%	41.53±3.36	68.30±6.40	56.41±5.71	0.003
CMC/%	32.20±2.24	54.71±5.22	44.77±2.90	0.001
BP/%	48.47±3.37	62.15±2.65	55.83±2.41	0.004
SMC/%	0.14±0.02	0.28±0.03	0.22±0.02	0.001
pH	6.49±0.30	5.98±0.16	5.50±0.14	0.004
OM/(g/kg)	66.85±9.17	131.42±9.09	113.42±4.20	0.000
TN/(g/kg)	3.44±0.77	7.26±1.07	5.52±0.41	0.003
TP/(mg/kg)	564.77±64.74	1064.60±187.09	742.77±36.64	0.005
AvP/(mg/kg)	19.34±1.14	41.76±2.68	42.60±3.31	0.000
AK/(g/kg)	20.60±1.18	13.19±0.47	15.72±0.73	0.000
AvK/(mg/kg)	250.87±41.62	110.77±9.39	231.25±33.30	0.003

续表

土壤因子 Soil factors	林分类型 Stand type			P
	BM	CB	QM	
T Mn/(mg/kg)	875.75±126.35	1071.37±174.57	1341.79±80.55	0.014
T Fe/(g/kg)	24.78±1.35	33.77±6.23	26.94±0.54	0.056
T Zn/(mg/kg)	71.27±8.37	79.77±4.45	71.23±4.05	0.210
T Cu/(mg/kg)	7.23±0.96	14.74±2.71	11.28±0.61	0.005
MBC/(mg/kg)	132.46±10.99	972.30±66.38	438.20±62.38	0.000
MBN/(mg/kg)	63.90±21.08	219.55±8.67	156.29±18.02	0.000
POD /(μmol g^{-1} h^{-1})	1.03±0.02	1.57±0.21	3.11±0.03	0.000
βG /(nmol g^{-1} h^{-1})	413.06±32.37	1294.11±147.51	728.79±52.90	0.000
NAG /(nmol g^{-1} h^{-1})	123.51±25.18	422.21±95.99	432.37±94.26	0.005
AP /(nmol g^{-1} h^{-1})	529.09±109.42	1603.87±180.29	1858.89±199.32	0.000
B/(nmol/g)	25.27±4.13	60.05±13.16	98.06±7.67	0.000
F/(nmol/g)	5.33±0.93	11.78±2.31	19.14±1.14	0.000
A/(nmol/g)	6.06±0.87	14.28±1.73	22.28±1.87	0.000

BM:阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest;CB:针阔混交林 Coniferous-broadleaved mixed forest;QM:蒙古栎纯林 *Quercus mongolica* forest;BD:容重 Bluk density;MMC:最大持水量 Maximum moisture capacity;CMC:毛管持水量 Capillary moisture capacity;BP:总孔隙度 Bulk porosity;SMC:土壤含水量 Soil moisture content;OM:有机质 Organic matter;TN:全氮 Total N;TP:全磷 Total P;AvP:速效磷 Available P;TK:全钾 Total K;AvK:速效钾 Available K;T Mn:全锰 Total Mn;T Fe:全铁 Total Fe;T Zn:全锌 Total Zn;T Cu:全铜 Total Cu;MBC:微生物量碳 Microbial biomass carbon;MBN:微生物量氮 Microbial biomass nitrogen;POD:过氧化物酶 Peroxidase;βG: β-1,4-葡萄糖苷酶 β-1,4-glucosidase;NAG: β-1,4-N-乙酰葡糖氨糖苷酶 β-1,4-N-acetylglucosaminidase;AP:酸性磷酸酶 acid phosphatase;B:细菌 Bacteria;F:真菌 Fungi;A:放线菌 Actinomycetes;$P<0.05$ 表示不同林分间差异显著,$P<0.01$ 表示不同林分间差异极显著

2.2 林下参土壤质量评价因子最小数据集的构建

2.2.1 土壤质量评价因子主成分分析

采用主成分分析对 25 项指标进行因子分析,特征值大于 1 的主成分(PC)共有 4 个,累计贡献率达到 88.741%(表 3),说明这 4 个 PC 基本上可以反映林下参土壤质量差异的主要影响因素。计算各土壤因子在各个 PC 上的成分因子载荷大小,并按照前述方法进行分组,第 1 PC 方差贡献率达到 65.78%,由 16 项土壤因子构成,大致反映了土壤物理、化学和生化特征;第 2 PC 由 6 项土壤因子构成,主要反映了土壤生化特征和化学特征;第 3 PC 由全 Zn 土壤因子构成,主要反映土壤化学特征;第 4 PC 由 pH 和速效 K 2 项土壤因子构成,主要反映土壤化学特征。

表 3 主成分旋转载荷矩阵及各因子得分计算结果

Table 3 Matrix of principal component rotation loadings and scoring of soil factors

土壤因子 Soil factors	分组 Grouping	主成分旋转载荷矩阵 Matrix of principal component rotation loadings				Norm 值 Norm value	调整 R^2 Adjusted R^2	因子得分和 Sum
		主成分 1 PC 1	主成分 2 PC 2	主成分 3 PC 3	主成分 4 PC 4			
BD	1	−0.834	−0.453	0.080	0.162	3.792	0.85	4.642
MMC	1	0.886	0.349	−0.052	−0.104	3.739	0.819	4.558
CMC	1	0.880	0.339	−0.032	−0.142	3.722	0.872	4.594
BP	1	0.840	0.329	−0.064	−0.110	3.538	0.785	4.323
SMC	1	0.795	0.342	−0.099	−0.206	3.429	0.883	4.312
OM	1	0.756	0.466	0.389	0.068	3.801	0.93	4.731
TN	1	0.824	0.359	0.364	0.093	3.775	0.803	4.578
TP	1	0.753	0.276	0.511	−0.058	3.506	0.768	4.274
AvP	1	0.610	0.596	0.143	−0.201	3.503	0.952	4.455
TK	1	−0.831	−0.384	0.049	0.241	3.680	0.936	4.616

续表

土壤因子 Soil factors	分组 Grouping	主成分旋转载荷矩阵 Matrix of principal component rotation loadings				Norm 值 Norm value	调整 R^2 Adjusted R^2	因子得分和 Sum
		主成分 1 PC 1	主成分 2 PC 2	主成分 3 PC 3	主成分 4 PC 4			
T Fe	1	0.772	0.125	0.080	−0.140	2.976	0.49	3.466
T Cu	1	0.770	0.312	0.459	0.144	3.567	0.775	4.342
MBC	1	0.894	0.201	0.262	−0.100	3.653	0.98	4.633
MBN	1	0.822	0.365	0.164	0.051	3.646	0.941	4.587
βG	1	0.872	0.272	0.310	0.086	3.718	0.945	4.663
NAG	1	0.693	0.552	−0.031	0.182	3.481	0.775	4.256
T Mn	2	0.405	0.697	0.175	0.497	3.029	0.675	3.704
POD	2	0.216	0.891	−0.063	−0.086	2.831	0.983	3.814
AP	2	0.671	0.689	−0.086	−0.021	3.734	0.929	4.663
B	2	0.433	0.855	0.129	−0.140	3.511	0.921	4.432
F	2	0.435	0.870	0.027	−0.101	3.487	0.934	4.421
A	2	0.404	0.773	0.412	0.063	3.377	0.953	4.330
T Zn	3	0.009	−0.026	0.932	0.142	1.416	0.208	1.624
pH	4	0.001	−0.462	0.144	0.816	1.726	0.795	2.521
AvK	4	−0.414	0.190	0.062	0.818	1.742	0.807	2.549
特征值 Eigenvalue		16.445	2.509	2.141	1.090			
方差贡献率 Variance Explained /%		65.780	10.037	8.565	4.359			
累计贡献率 Cumulative variance explained /%		65.780	75.817	84.382	88.741			

在此基础上,按照前述方法计算各土壤因子的 Norm 值、可调整 R^2,以及两者线性化值之和,选择各组最高得分值,以及最高值 5%内的土壤因子,得到候选 MDS。最终,该候选 MDS 包括容重、最大持水量、毛管持水量、有机质、全 N、全 K、微生物量 C、微生物量 N、βG、AP、细菌、Zn、pH 和速效 K 共 14 项土壤因子,可以基本反映最初 25 项评价因子的土壤质量信息。

2.2.2　土壤质量评价因子最小数据集的确定

对 14 项候选土壤因子进一步相关分析表明,不同土壤因子间存在显著的相关性。根据土壤质量评价因子相对独立性原则,依据专家经验法对上述 14 项土壤因子进行优化。第一组包括 8 项土壤因子,各因子间显著相关。在土壤物理指标方面,相对于最大持水量、毛管持水量,容重可以综合性地反映土壤的结构、透气、透水性,以及保水能力的高低,因此,选择容重进入 MDS;在土壤化学指标方面,相对于全 N、全 K,一方面有机质与土壤容重相关性略低,另一方面,有机质对于土壤水分、通气性、抗蚀力、养分有效性以及微生物活性都具有明显影响,可以更综合地反映土壤肥力状况,因此,选择有机质进入 MDS;同时,考虑到微生物量 C 与已选入 MDS 的有机质具有更高相关性,故将微生物量 N 纳入 MDS;第二组包括 3 项土壤因子,其中,酸性磷酸酶(AP)能够增加土壤有机质的脱磷速度,提高磷的有效态含量,一般与速效 P 显著相关,而 β-葡萄糖苷酶(βG)促进纤维素分解,有利于有机质的转化,一般与有机质显著正相关,二者极显著相关,因此,选择 AP 表征土壤酶活性,舍去第一组中 βG。在微生物方面,细菌得分值最高,其在土壤养分转化过程中具有重要作用,同时与真菌、放线菌也具有显著相关性,因此,将其选入 MDS;第三组包括 2 项土壤因子,pH 随着人参种植年限的增加呈现出酸化的趋势,并会影响土壤生物活性,降低养分有效性,对于人参的生长具有重要影响,故应选入 MDS;速效 K 与其它候选土壤因子间相关性较低,相对独立,故应选入 MDS;第四组仅有土壤因子全 Zn,其与其它土壤因子相关性较低,并可以有效表征土壤微量元素的差异和变化趋势,应选入 MDS。综上所述,最终确定林参复合经营土壤质量评价 MDS 由容重、pH、有机质、速效 K、MBN、AP、细菌和全 Zn 8 项土壤因子

组成。

2.3 林下参土壤质量综合评价

2.3.1 不同样地人参土壤最小数据集的统计特征

基于上述分析确定的 MDS,分别对 3 种林分类型下不同年限人参土壤的 8 项土壤因子进行单因素方差分析,结果如图 2 所示。

就容重而言,BM 对照样地容重最高为 1.30 g/cm^3,高于 CB 和 QM 对照样地,并且 3 种林分下人参种植年限对土壤容重并无显著影响。

就 pH 而言,BM 对照样地 pH 最高为 6.49,3—12a 人参土壤 pH 呈现波动下降的趋势,其中 3a 人参土壤 5.65 显著低于对照样地;CB 和 QM 下 14a 和 20a 人参土壤均显著低于对照样地。

就有机质而言,BM 对照样地为 66.85 g/kg,3a 人参土壤开始显著降低,6、9、12a 人参土壤的有机质含量保持平稳波动,四者均显著低于对照样地;CB 和 QM 下 14a 和 20a 人参土壤均显著低于对照样地。

就速效 K 而言,BM 对照样地为 250.87 mg/kg,3a 人参显著减少到 140.37 mg/kg,此后 6、9、12a 人参土壤速效 K 含量保持平稳缓慢上升,但均明显低于对照样地;CB 和 QM 下 14a 和 20a 人参土壤均显著低于对照样地。

就全 Zn 而言,BM 对照样地为 71.27 mg/kg,3—12a 人参土壤呈现出"M"型波动趋势,并与对照样地无显著差异;CB 对照样地为 79.77 mg/kg,略高于 14a 人参土壤;QM 对照样地为 71.23 mg/kg,显著高于 20a 人参土壤。

就 MBN 而言,BM 对照样地为 63.90 mg/kg,此后 3—12a 人参土壤呈现出"W"型趋势,6a 人参土壤 MBN 含量最高,显著高于其它四者;3a 人参土壤 MBN 含量最低,显著低于 6a 和 12a 人参土壤含量;CB 和 QM 对照样地分别为 219.55 mg/kg 和 156.29 mg/kg,均显著高于相同林分下 14a 和 20a 人参土壤。

就 AP 而言,BM 对照样地为 529.02 nmol g^{-1} h^{-1},3a 人参土壤活性降低到 276.73 nmol g^{-1} h^{-1},6a 人参土壤活性又上升到 491.71 nmol g^{-1} h^{-1},此后,9、12a 人参土壤活性平稳波动;CB 和 QM 对照样地分别为 1603.87 nmol g^{-1} h^{-1}和 1858.89 nmol g^{-1} h^{-1},均显著高于相同林分下 14a 和 20a 人参土壤。

就细菌而言,BM 对照样地为 25.27 nmol/g,3a 人参土壤有所下降到 17.91 nmol/g,此后细菌含量平稳上升,但与对照样地相比差异并不显著;CB 对照样地为 60.05 nmol/g,低于 14a 人参土壤;而 QM 对照样地为 98.06 nmol/g,显著高于 20a 人参土壤。

2.3.2 不同样地人参土壤质量评价

通过对研究区 9 种样地 MDS 中土壤因子进行测定,并结合人参种植土壤的适宜性确定各土壤因子的隶属度函数。其中,土壤容重属于降型隶属度函数,pH、有机质、速效 K、MBN、AP、细菌、全 Zn 属于升型隶属度函数。此外,按前述方法计算各土壤因子权重,并结合表 5 及式(2)—式(4),最终得到研究区不同样地土壤质量的评价结果(图 3)。

从 3 种不同林分对照样地来看,针阔混交林土壤质量最高,为 0.764;蒙古栎纯林略低,为 0.745;二者明显高于阔叶混交林土壤质量的 0.354。从不同人参年限来看,阔叶混交林下土壤质量变化并不明显,其中 3a 人参土壤质量明显降低,为 0.354;6、9a 和 12a 人参土壤质量有所上升,并表现出平稳波动的态势,与对照样地并无明显变化。针阔混交林下 14a 人参土壤质量为 0.614,相对于对照样地降低了 19.63%。蒙古栎纯林下 20a 人参土壤质量为 0.385,相对于对照样地降低了 48.32%,变化明显。

3 讨论

本研究利用多元方差分析、主成分分析和相关分析等统计方法定量分析了不同林分类型和人参种植年限对土壤因子的影响程度,并依据一定的标准进行分组确定了最终的林下参土壤质量评价 MDS。在利用主成分分析确定候选 MDS 过程中,本研究并不是考虑土壤因子在单个主成分的载荷,而是综合考虑了土壤因子在

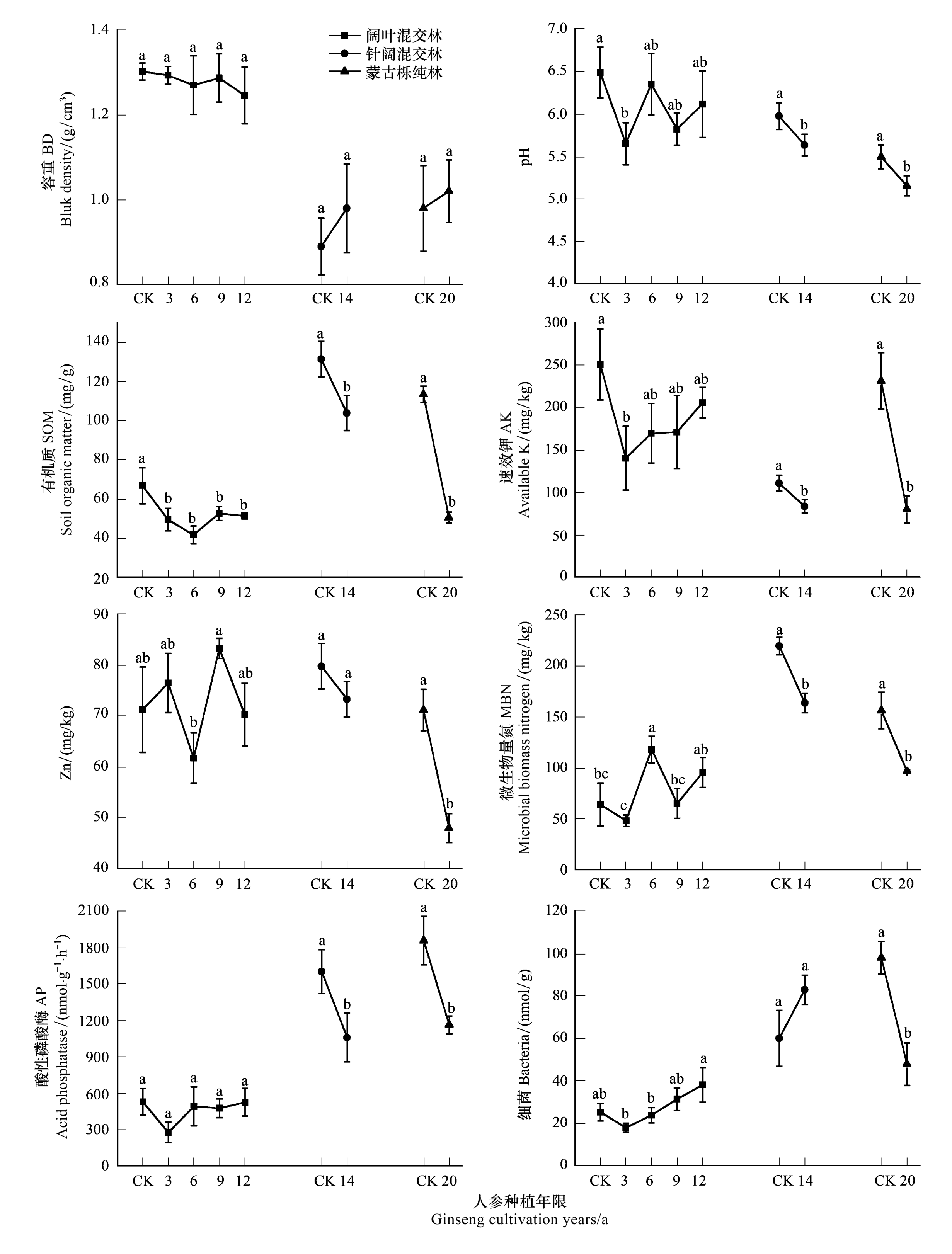


图 2　3 种林分不同年限人参土壤最小数据集的单因素方差分析

Fig.2　One-way ANOVA of MDS among three kinds of forest types with different ginseng cultivation years

不同小写字母表示同种林分类型下不同人参年限间差异显著(P<0.05)

所有主成分上的综合载荷 Norm 值,以及不同林分类型对土壤因子的影响程度可调整 R^2,因而更具普遍性。然而,由于土壤空间变异性、林分类型特征等多种因素的影响,土壤质量因子往往表现出不同的结果,以及考虑到林下参生长周期较长、价值较高,本研究在样地选择和数量上无法做到控制实验,但鉴于目前林下参土壤质量评价比较缺乏,本研究最终确定的林下参土壤质量评价 MDS 对于今后的研究和实践依然具有重要参考意义。

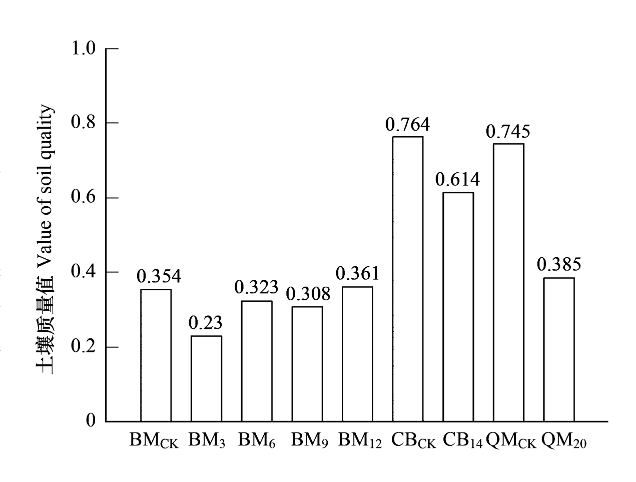


图 3 不同样地土壤质量

Fig.3 Soil quality relative to different plots

BM_{CK}、BM_3、BM_6、BM_9、BM_{12}:分别表示阔叶混交林下未种植人参对照样地土壤,以及 3 年、6 年、9 年和 12 年人参根围土壤;CB_{CK}、CB_{14}:分别表示针阔混交林下未种植人参对照样地土壤和 14 年人参根围土壤;QM_{CK}、QM_{20}:分别表示蒙古栎纯林下未种植人参对照样地土壤和 20 年人参根围土壤

目前,对于林下参土壤质量的适宜性及其变化依然缺乏系统的研究。本研究在确定林下参土壤质量评价 MDS 中各土壤因子的隶属度函数时,仅根据研究区所测定的各指标研究结果,结合专家经验法,以各测定值没有对人参生长产生明显限制为前提,计算了各土壤因子的隶属度值。而在实际过程中,当某些土壤因子达到人参生长的限制阈值时,可能会严重影响到人参的生长,从而导致人参无法健康生长。因此,本研究确定的 MDS 中各土壤因子的隶属度函数应用到其它样地时,依然需要慎重考虑。

本研究中,从不同人参年限土壤因子的变化趋势来看,随着人参的种植, pH 逐渐降低,土壤呈现出酸化的趋势;有机质、速效钾、Zn 等养分含量以及微生物量氮、酸性磷酸酶等活性在前期有所波动,一定年限后开始显著降低;而细菌含量在前期有持续增加的趋势,一定年限后开始显著降低,这可能与人参自身生长以及土壤理化性质明显降低直接相关。综合来看,当人参生长到 15a 以后,土壤因子大多明显降低,这必然会影响到此后人参的种植,从而可能出现连作障碍。在此基础上,本研究对 3 种林分不同人参年限的 9 种样地土壤质量值进行了定量评价。其中,针阔混交林和蒙古栎纯林对照样地土壤质量值明显高于阔叶混交林对照样地,考虑到样地的立地特征比较接近,可能由于 33a 针阔混交林和 40a 蒙古栎纯林在养分累计效应和微生物活性方面要明显高于 24a 阔叶混交林,以及阔叶混交林样地土壤容重过高,物理结构较差所引起的。另外,阔叶混交林下土壤质量值随人参种植年限变化呈现先下降后上升的趋势,其中 3a 人参土壤质量值下降比较明显,这一方面可能说明阔叶混交林样地本身土壤质量较低,对于人参生长已具有一定的限制;另一方面说明人参生长过程中,不同年限人参土壤因子存在波动性,特别是微生物活性,从而对土壤质量产生影响。而在针阔混交林和蒙古栎纯林下,14a 和 20a 人参土壤质量值明显下降,这说明随着人参种植年限的增加,土壤质量呈现出普遍下降的趋势。

4 结论

本研究通过对 3 种林分不同人参年限土壤的初始 25 项土壤因子进行分析,最终获得研究区林参复合经营土壤质量评价 MDS。该 MDS 共包括了 8 项土壤因子,其中,物理因子包括容重,可用来表征土壤的结构、透气、透水性等方面;化学因子包括 pH、有机质、速效 K、全 Zn,可用来表征土壤的酸碱度、养分含量和微量元素的状态;生物学因子包括 MBN、AP、细菌,可用来表征土壤养分转化速率、酶活性以及微生物活性等方面。通过优化筛选出的 MDS 可用于研究区林下参土壤质量评价,并对其它地区林下参样地土壤质量评价具有重要参考价值。

基于模糊数学法定量计算了研究区 9 种样地的土壤质量值,其中,CB_{CK}(0.764)>QM_{CK}(0.745)>CB_{14}

(0.614) > QM_{CK} (0.385) > BM_{12} (0.361) > BM_{CK} (0.354) > BM_6 (0.323) > BM_9 (0.308) > BM_3 (0.230),该评价结果与实地观测基本一致。

林参复合经营作为辽东地区典型的林下经营模式,具有广阔的前景。今后,在林参复合经营发展过程中,应积极建立产学研基地,加强林下参土壤质量的持续监测和评价,加大分子生物学在解决人参连作障碍和病害方面的研究力度,同时注重科学发展、正确引导林农进行参地选择和管理,提高林农经济收入,促进人参产业的可持续发展。

参考文献(References):

[1] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, Stewart B A, eds. Defining Soil Quality for A Sustainable Environment. Madison: SSSA Special Publication, 1994: 3-21.

[2] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 马克明. 我国土壤质量及其评价研究的进展. 土壤通报, 2006, 37(1): 137-143.

[3] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.

[4] 陶宝先, 张金池, 林杰, 张波, 崔志华, 孔雨光, 俞元春. 苏南丘陵不同林分类型土壤质量评价. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(6): 74-78.

[5] 黄勇, 杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展. 地质通报, 2009, 28(1): 130-136.

[6] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 邱炜红, 谭启玲. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价. 土壤通报, 2012, 43(5): 1145-1150.

[7] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 孙余丹, 胡砚秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. 生态学报, 2014, 34(9): 2297-2307.

[8] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 李旭, 任丽娜. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1553-1560.

[9] 纪浩, 董希斌. 大兴安岭低质林改造后土壤肥力综合评价. 林业科学, 2012, 48(11): 117-123.

[10] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Seoane S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(5): 877-887.

[11] Morari F, Lugato E, Giardini L. Olsen phosphorus, excin two long-term experiments of north-eastern Italy and assessment of soil quality evolution. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 124(1/2): 85-96.

[12] 黄婷, 岳西杰, 葛玺祖, 王旭东. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 141-147, 187-187.

[13] 刘畅, 邢兆凯, 刘红民, 贾树海, 李明, 赵旭炜, 程利. 辽西低山丘陵区不同农林复合模式土壤质量评价. 土壤通报, 2014, 45(5): 1049-1053.

[14] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. 林业科学, 2004, 40(2): 152-159.

[15] 宋晓霞. 人参土壤微生物群落结构研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.

[16] 张亚玉, 孙海, 宋晓霞. 农田栽参根区土壤酶活性与土壤养分的关系. 吉林农业大学学报, 2010, 32(6): 661-665, 683-683.

[17] 张鸿雁, 薛泉宏, 唐明, 王玲娜, 段春梅. 不同种植年限人参地土壤放线菌生态研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 151-159.

[18] 孙海, 王秋霞, 张亚玉, 杨振, 徐成路. 不同生产模式下人参土壤肥力评价. 吉林农业大学学报, 2015, 37(3): 323-331.

[19] 田晓娅. 快速测定土壤中速效 P, K 的 ICP—AES 分析方法研究. 光谱实验室, 1997, 14(4): 40-43.

[20] 徐丽丽, 王秋兵, 张心昱, 孙晓敏, 戴晓琴, 杨风亭, 部金凤, 王辉民. 不同肥料对稻田红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响. 应用生态学报, 2013, 24(4): 909-914.

[21] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 55-88.

[22] Zelles L, Bai Q Y, Beck T, Beese F. Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicators of microbial biomass and community structure in agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(4): 317-323.

[23] Frostegård Å, Bååth E, Tunlio A. Shifts in the structure of soil microbial communities in limed forests as revealed by phospholipid fatty acid analysis. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(6): 723-730.

[24] Frostegård Å, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. Biology and Fertility of Soils, 1996, 22(1/2): 59-65.

[25] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(1): 167-176.

[26] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 孙志英. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集. 土壤学报, 2008, 45(1): 16-25.

[27] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价. 土壤学报, 2015, 52(3): 682-689.

[28] Sharma K L, Mandal U K, Srinivas K, Vittal K P R, Mandal B, Grace J K, Ramesh V. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. Soil and Tillage Research, 2005, 83(2): 246-259.